



# 斜顶板桩承台接岸结构优化设计

杨旭东，马哲超

(中交第三航务工程勘测设计院有限公司，上海 200032)

**摘要：**针对斜顶板桩承台接岸结构造价较高的问题，结合洋山港区实际应用情况进行优化设计研究。采用与已建结构相同的计算方法进行使用条件和结构受力特点的对比分析，得出类似结构在软土地基的大型集装箱码头中应用可以显著优化结构。采取分级实施墙后棱体、取消后排支撑桩、利用组合钢板桩优化密排钢管板桩、将承台简化为导梁等优化措施，形成一种新的半直立式接岸结构形式，即斜顶板桩结构。结果表明：斜顶板桩与下级棱体组成的独立稳定结构体系较好地适应了前期软土地基高填土的变形特点和后期上部结构的使用要求。新结构更合理地利用桩基结构承载能力，明显提高了经济性，有利于在软基地区的类似工程中推广。

**关键词：**斜顶板桩；接岸结构；软土地基；高填土；混合堤

中图分类号：U65

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)06-0211-07

## Optimization of design for bulkhead structure with inclined support pile and sheet pipe pile platform

YANG Xudong, MA Zhechao

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** Aiming at the high cost of the bulkhead structure with inclined support pile and sheet pipe pile platform, combined with the practical application of the Yangshan Port area, the optimization design is studied. Using the same design calculation model as the existing structure, the use conditions and mechanical characteristics of the structure are compared and analyzed. The conclusion is drawn that the application of similar structures in large container terminals on soft soil can significantly optimize the structure. A new type of semi-vertical bulkhead structure, namely inclined top support sheet pile structure, has been formed by staging construction rock mound behind the wall, canceling the back supporting pile, using the composite sheet pile of steel pipe and steel plate optimize the closely steel sheet pile structure, optimizing the big platform as a small guide beam. The results show that the independent stable structure system composed of inclined top support sheet pile and the lower rock mound can better adapt to the earlier deformation characteristics of high fill in soft soil foundation and the use requirements of superstructure in the later period. The new structure makes more rational use of the bearing capacity of pile foundation structure and is more economical. It is conducive to the popularization of similar projects in soft foundation area.

**Keywords:** inclined support sheet pile; bulkhead structure; soft foundation; highly-filled soil; composite embankment

### 1 工程概况

斜顶板桩承台是在洋山工程中产生的特定挡土结构，它是一种直立式接岸结构<sup>[1]</sup>。在挡土高差大、地基软土层厚、土性差、建设工期短、回

填速度快、回填高度高等恶劣建设条件下，该结构解决了码头和陆域回填同步施工、相互影响的矛盾，在洋山港区得到了成功应用。典型断面见图 1。

收稿日期：2023-09-30

作者简介：杨旭东（1975—），男，高级工程师，从事港口工程设计和研究。

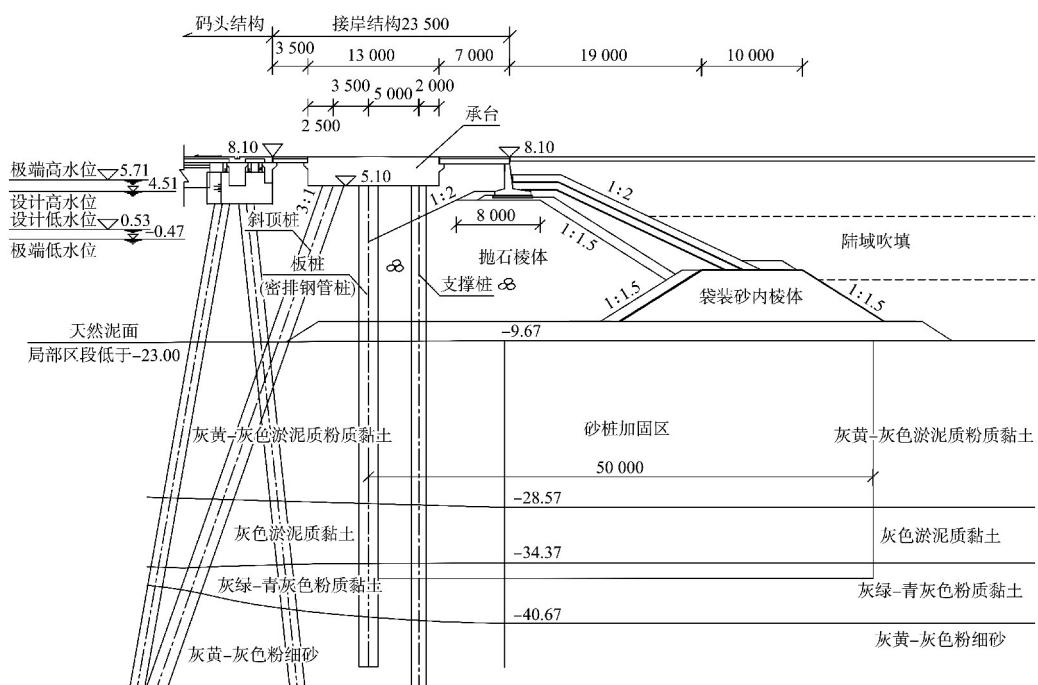


图 1 斜顶板桩承台式接岸结构 (尺寸: mm; 高程: m)

朱林祥<sup>[2]</sup>、方君华<sup>[3]</sup>先后在洋山深水港区一、二期工程设计中对斜顶板桩承台结构设计和模拟计算方法进行了研究。目前已实施项目的工程设计均以简化的空间弹性模型计算分析( $m$  法)为主<sup>[4]</sup>。

由于斜顶板桩承台结构造价高，并未在同类

软土地区的其他相关工程中推广。为合理节约投资成本，本文结合洋山港区后续规划建设项目的设计变化条件，在总结洋山港区类似接岸结构实际应用的基础上进行对比，提出优化后的斜顶板桩结构，见图 2。

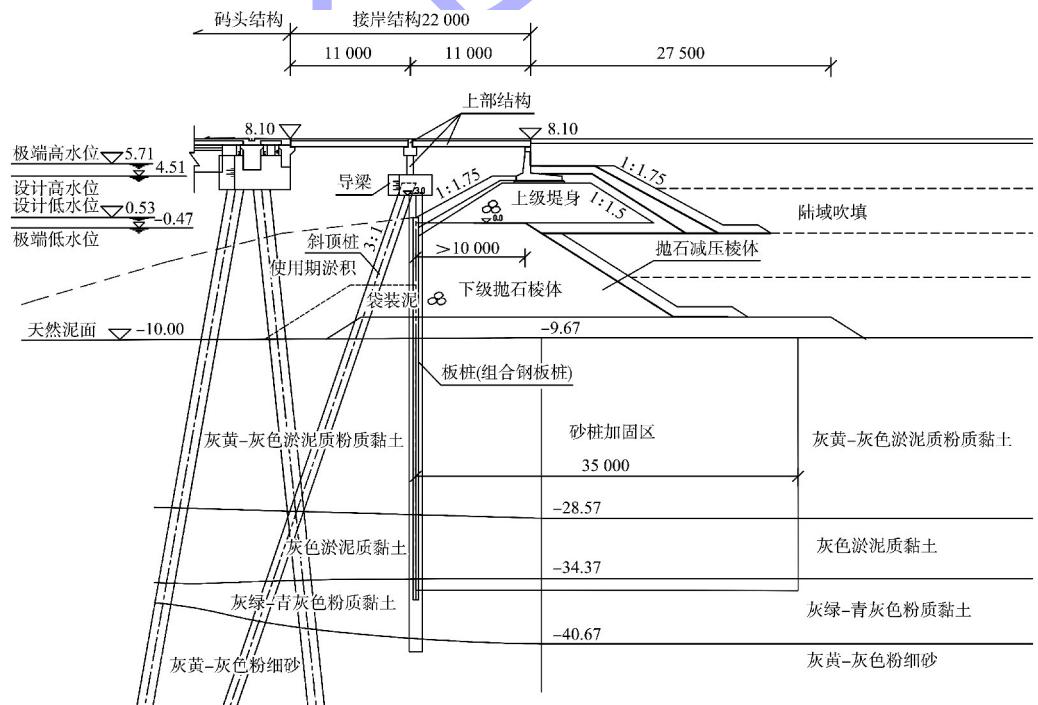


图 2 优化后斜顶板桩式接岸结构 (尺寸: mm; 高程: m)

优化方案采用“半直立式”接岸结构形式, 其下部基础的直立式岸壁有别于斜坡式接岸结构; 利用斜顶桩取代板桩墙后的锚定结构, 并与下级减压棱体一起形成约束水平变形的独立稳定结构体系, 明显不同于传统板桩结构。

优化结构导梁下部的桩基础不仅实现水平挡土功能, 且有足够的垂直承载力承担上部使用荷载; 导梁顶部以上结构在下部基础位移大部分完成后实施, 以确保码头和岸坡可靠连接。

斜顶板桩接岸结构在取消上部结构、降低导梁高程、加强上部斜坡护面等适当调整后, 还可以作为混合堤结构广泛应用于软基地区的护岸、围堤等类似结构。

## 2 结构应用

斜顶板桩承台结构已应用于洋山深水港区一~四期工程, 至今已连续监测多年。其主要桩基结构内力见表1, 沉降位移观测情况<sup>[5-8]</sup>见表2。

表1 洋山港区接岸结构桩基内力

工程项目	斜顶桩		支撑桩		板桩		备注
	桩径/m	轴力/kN	桩径/m	轴力/kN	桩径/m	应力/MPa	
一期工程	1.7	5 062	1.2	4 099	1.7	109	893
二期工程	1.8~2.0	7 741	1.5	5 661	1.9	129	1 113
三期工程	2.0	7 800	1.5	5 560	1.9	152	1 186
四期工程	2.0	6 532	1.5	5 247	1.9	135	1 324

表2 洋山港区接岸结构位移沉降

工程项目	计算最大位移/mm	一般实测位移/mm	个别异常极值位移/mm	后沿一般实测沉降/mm	极值沉降/mm	施工/交工年份
一期工程	49~74	10~66	-	2.6~25.2	57	2002/2005
二期工程	30~81	14~53	205	2.1~19.9	-	2003/2006
三期工程	45~98	43~128	549	17.0~28.0	56	2004/2008
四期工程	43~72	7~61	-	4.8~7.2	-	2009/2014

1) 根据实测数据, 结构不利工况主要出现在施工加载期(含后方陆域吹填、堆载预压等施工), 施工加载完成后, 墙后孔隙水压力消散明显<sup>[9]</sup>; 使用期沉降位移监测均相对稳定。

2) 承台后沿沉降与回填高度以及天然地基软土层厚度相关, 支撑桩受负摩擦影响明显<sup>[10]</sup>。斜顶桩轴力对填土高差、地基软弱层厚度变化不敏感, 但斜顶桩桩顶应力对由此产生的支撑桩下沉变形、板桩鼓凸变形等极端工况相对敏感。密排板桩轴力小, 结构安全冗余大, 结构水平抗弯承载力和轴向承载力均未得到充分发挥。

3) 施工期及使用期的多年监测、检测均未发现前方码头结构存在明显异常<sup>[11]</sup>; 即使在承台沉降位移较大的局部异常区段, 施工期监测和探摸也均未发现板桩墙前有隆起、推挤码头后排桩基

变形等异常情况。实际应用表明: 在码头前后方同步施工时, 斜顶板桩挡土结构起到了阻隔或减少墙后高回填土产生的地基变形对码头结构影响的作用。

4) 控制墙后回填施工加载速率是减少斜顶板桩承台结构实际整体变形、保证结构安全的最关键施工措施。当墙后回填施工加载速率受控的情况下, 监测数据均与设计计算基本一致, 结构位移可控, 基本表现为弹性变形。但当施工加载速率较快时, 如三期口门段承台后方局部区域在2006年1月初前后的一周内回填加载厚度超过10 m, 天然地基软弱土体未能充分排水固结, 承台结构施工期位移超过48 cm。采用PLAXIS软件进行有限元数值模拟分析, 此时结构位移主要表现为塑性变形, 见图3。

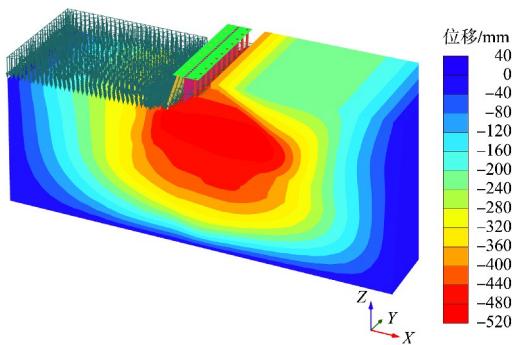


图 3 异常加载区段计算模拟

### 3 设计条件对比

1) 洋山港区以集装箱泊位为主，岸桥荷载和堆场等较大垂直荷载均布置在接岸结构的前后方一定距离处，接岸结构使用期主要承受流动机械荷载和 10 kPa 左右均载，荷载基本可控。当前集装箱码头自动化趋势明显，为增强运营效率，码头平面布局往往明确要求满堂式连片布置。

2) 洋山后续建设区域的高含沙水域环境、软土地基等自然条件与前期实施的洋山工程基本相近。斜顶板桩结构相比于传统重力式结构、斜坡堤结构仍具有独特的优势，板桩既是挡土建筑物，又是维持岸坡整体稳定的止滑桩，和斜顶桩一起组成接岸结构。可有效减少码头后方吹填、回填

施工对码头的影响。

3) 洋山港区后续建设的码头以支线泊位为主，码头等级一般不大于 10 万吨级。码头后沿布置接岸结构区域的天然泥面约 -10 m，接岸结构挡土高度在 20 m 以内。挡土高差需求减少为结构大幅优化提供了可能。

4) 施工工艺日趋成熟以及参建各方管理能力的提高为同类结构优化和成功实施提供了保障。

### 4 优化方案

#### 4.1 主要优化创新点

1) 取消减压棱体后坡脚的袋装砂内棱体，分级实施板桩墙后减压棱体，有效降低施工期墙后土压力不可控的隐患。原设计内棱体先期实施作为陆域吹填的水下围堤，后期作为接岸结构减压棱体的一部分。洋山港水域的高含沙水体环境，施工期极易在内棱体和密排板桩之间区域形成淤泥夹层，见图 4。随着环保要求和施工管理能力的提高，总体施工顺序优化后，分级实施抛石减压棱体不但可以满足工期要求、减少工程量，更有利保证施工质量。

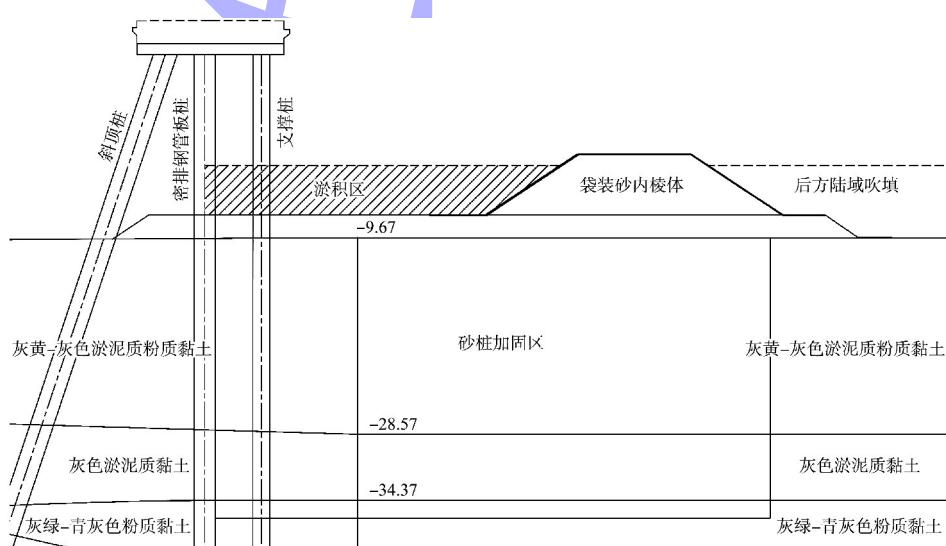


图 4 原设计减压棱体淤积 (单位: m)

2) 取消后排支撑桩，结构受力更明确。原设计设置后排支撑桩的主要目的是加大承台宽度、起卸荷作用，降低墙后土压力；同时在后沿支撑

承台，减缓斜顶桩结构在施工期前后刚度的不对称程度。但由于支撑桩位于软基上高填土加载的敏感区域，支撑桩受负摩擦影响明显。虽然《建筑

桩基技术规范》对桩侧负阻力做出了明确规定, 但计算值与实测值差异的不确定性较大; 尤其是难以定量评估不同加载速率及周边不同加载顺序的情况下, 棱体抛填对支撑桩的侧向挤压影响。当软基较厚、支撑桩桩径较小或桩长较短时, 在较大负摩擦效应和不平衡高填土产生水平土压力等因素的共同作用下, 支撑桩反而可能加剧承台结构向后扭转。

由于密排板桩结构本身足够安全冗余, 当取消支撑桩后, 板桩墙的土压力和板桩应力虽有所增大, 但斜顶板桩结构受力更明确, 结构变形预测更可控。

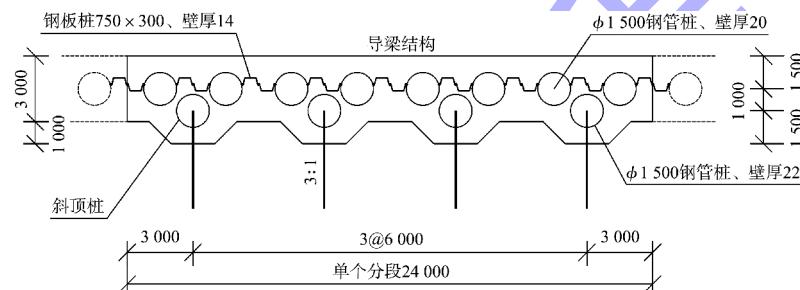


图 5 组合板桩布置 (单位: mm)

## 4.2 优化结构计算

### 4.2.1 计算模型

1) 以图 1 和 2 所示典型断面为例, 按柔性高桩墩台结构、取单个分段进行计算。计算模型见图 6。

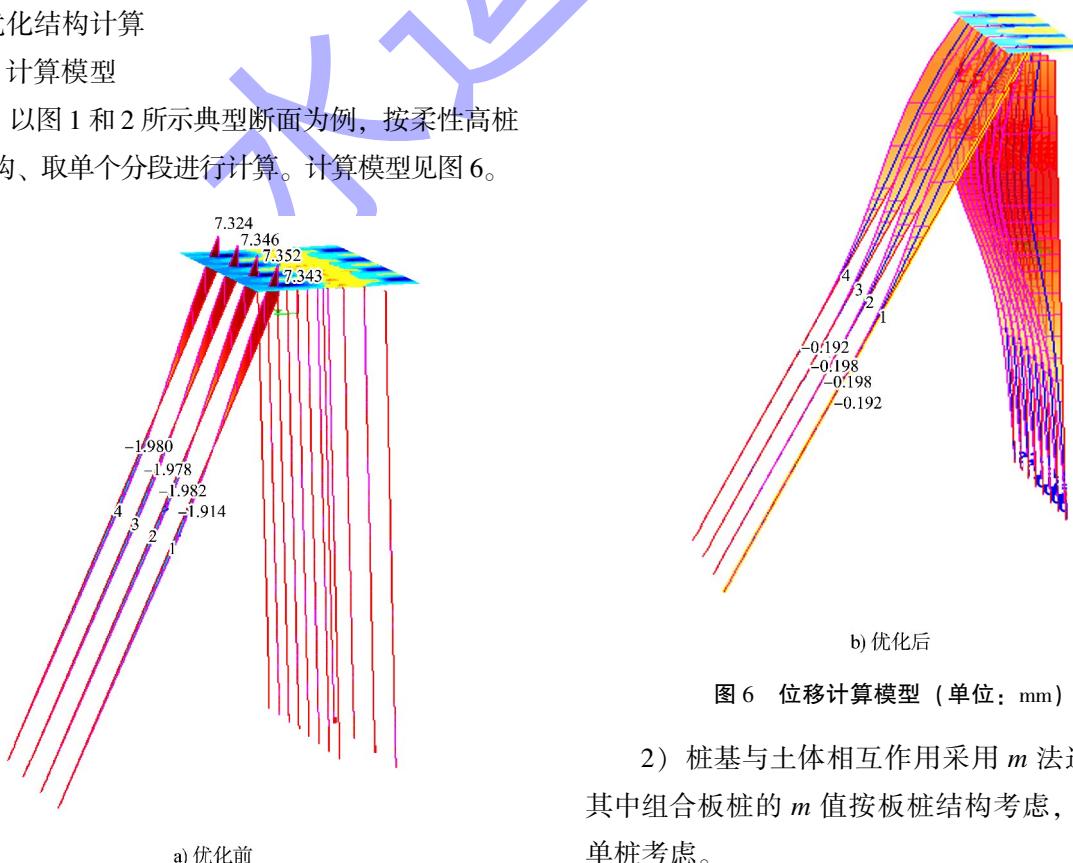


图 6 位移计算模型 (单位: mm)

2) 桩基与土体相互作用采用  $m$  法进行计算, 其中组合板桩的  $m$  值按板桩结构考虑, 斜顶桩按单桩考虑。

3) 减小斜顶桩与板桩间水平距离, 优化斜顶桩和承台结构。

4) 优化密排板桩结构, 合理利用结构承载能力。已建斜顶板桩承台结构密排板桩采用 1.9 m 钢管直桩间隔 2.0 m 布置, 与后方抛石减压棱体、反滤等结构一起, 发挥了较好的挡土作用; 但板桩结构强度利用率明显偏低。优化后的钢管+钢板组合结构(图 5)大幅减少每延米板桩墙的用钢量。

5) 上部设置后浇柱、梁、板结构, 有效减少施工期结构水平不可逆位移对码头使用的不利影响。

3) 组合板桩中钢管桩的惯性矩和截面模量远大于钢板桩, 相关研究表明: 当桩间距和桩径之比为 2~6 时, 土拱效应明显<sup>[12-13]</sup>。为保证安全冗余, 组合板桩中的钢管桩作为主要承力构件, 承担桩间土的全部土压力(钢板桩作为次要构件, 按照

土拱效应分配的侧向土压力另行验算结构强度)。

4) 计算参数选取原则与已建工程保持一致, 各土层主要参数取值见表 3。

5) 整体稳定、踢脚稳定、桩基承载能力、承台结构配筋验算等另行建模计算。

表 3 各土层主要参数取值

土层名称	<i>m</i> 值	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	天然密度/(t·m <sup>-3</sup> )	含水量/%	液性指数
灰黄-灰色淤泥质粉质黏土	1 000~2 000	18.3	11.8	1.71	44.0	1.54
灰色淤泥质黏土	2 000	16.4	12.0	1.69	43.7	1.16
灰绿-青灰色粉质黏土	4 000	23.0	40.9	1.98	25.3	0.33
灰黄-灰色粉细砂	5 000	33.8	3.2	1.98	21.4	-
吹填砂	5 000	28.0~30.0	0	1.80	-	-
块石	10 000	35.0~40.0	0	1.70	-	-

#### 4.2.2 主要结果及分析

桩基结构主要内力成果见表 4。计算结果表明:

1) 取消支撑桩后, 桩基结构内力和结构水平位移略有增大; 斜顶板桩承台结构取消支撑桩可行。

2) 控制结构顶部位移的主要因素是斜顶桩的承载能力, 斜顶桩与板桩间的距离大小对斜顶板桩承台结构整体水平位移影响不敏感(主要影响承台混凝土内力及其结构配筋); 斜顶桩更靠近板桩桩顶, 对减小承台顶面前高后低的扭转变形、

减少斜顶桩桩顶应力反而略有利。

3) 理论计算成果和类似组合钢板桩码头项目的成功应用表明, 斜顶板桩结构的密排管桩结构优化为钢管桩+钢板桩的组合板桩结构后, 板桩结构满足结构安全要求。

4) 主要水平荷载和结构变形一般发生在施工期, 上部柱梁板结构在后方加载基本完成后再后浇施工, 可将结构后续变形控制在 20 mm 以内; 承台(导梁)上部结构的后续加载和使用期的垂直荷载效应在主要桩基结构内力的占比小于 30%(较小的板桩钢管桩轴力除外)。

表 4 桩基结构主要内力成果

结构形式	承台顶位移/mm	板桩位移/mm	支撑桩轴力/kN	斜顶桩轴力/kN	板桩(钢管桩)轴力/kN	板桩(钢管桩)应力/MPa	备注
	mm	mm	kN	kN	轴力/kN	应力/MPa	
原结构	45	46	3 362	5 110	1 177	134	结构宽度 13 m, 见图 1
取消支撑桩	56	52	-	5 221	1 963	141	结构宽度 8 m, 其余同原结构
减少斜顶桩与板桩间距	39	47	-	6 230	1 537	152	间距 1.0 m, 结构宽度 4 m, 其余同取消支撑桩结构
优化板桩和斜顶桩结构	42	89	-	5 264	2 338	232	采用组合板桩, 承台优化为导梁等, 见图 2
优化结构施工期	38	67	-	3 806	812	188	上部结构未实施, 墙后回填至 5.0 m 以上, 其余同优化板桩与斜顶桩结构

#### 4.3 优化工程量及造价对比

结构优化前后主要参数和工程量对比见表 5,

优化后接岸结构造价可节约 30% 左右。

表5 优化前后主要参数和工程量对比

项目	楼体土	砂桩/	承台	直径/m		
	石方/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	混凝土/m <sup>3</sup>	支撑桩	板桩	斜顶桩
优化前	9 910	8 100	1 032	1.5	直径 1.9 间距 2.0	1.8
优化后	7 150	6 450	182	-	组合板桩	1.5
优化比例/%	27.9	20.4	82.2	100	30.7	16.7

注: 对应单个结构分段的工程量。

## 5 结论

1) 斜顶板桩承台结构取消支撑桩、减小斜顶桩与板桩距离、密排钢管板桩优化为组合钢板桩、减少承台结构尺度等结构优化措施可行。尤其是当密排板桩挡土高差小于 20 m、板桩墙后土压力基本可控的情况下, 接岸结构优化后的受力更明确, 结构更经济。

2) 计算分析和斜顶板桩承台结构应用的长期实测数据均表明, 斜顶板桩结构水平位移主要发生在墙后回填的施工加载期。承台(或导梁)上部结构施工宜选择合适的后浇施工时机。后浇施工完成后, 结构承受后续使用荷载的结构应力增加值较小、结构变形有限, 优化结构可以满足使用要求。

3) 斜顶板桩结构承台尺寸大幅减小, 优化成导梁后更类似于半直立式接岸结构, 或分级加载的半直立式混合堤结构。优化后的斜顶板桩结构是维持围堤结构整体稳定的关键结构(板桩即止滑桩), 它不仅是围堤结构分级加载的下级围堤结构的一部分, 又是码头接岸结构的桩基基础。结构优化后经济性得到明显提高, 可为洋山港区后续工程及其他软基地区的接岸结构、半直立式围堤结构等类似工程提供参考。

## 参考文献:

[1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 码头结构设

- 计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] 朱林祥. 洋山深水港区一期工程码头结构设计[J]. 上海建设科技, 2004(4): 3-5.
- [3] 方君华. 高填土斜顶板桩承台驳岸结构应用技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [4] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 上海国际航运中心洋山深水港区四期工程初步设计[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2014.
- [5] 中建港航局集团有限公司. 上海盛东国际集装箱码头有限公司一期码头使用期沉降位移观测(第二十九次)技术报告[R]. 上海: 中建港航局集团有限公司, 2022.
- [6] 中建港航局集团有限公司. 上海盛东国际集装箱码头有限公司二期码头使用期沉降位移观测(第二十五次)技术报告[R]. 上海: 中建港航局集团有限公司, 2022.
- [7] 中建港航局集团有限公司. 上海冠东国际集装箱码头有限公司 3、4 号码头使用期变形测量(第 29 次)简报暨技术总结[R]. 上海: 中建港航局集团有限公司, 2023.
- [8] 中建港航局集团有限公司. 上海国际港务(集团)股份有限公司山东集装箱码头分公司港区沉降观测(第 9 次)技术报告[R]. 上海: 中建港航局集团有限公司, 2022.
- [9] 中港第三航务工程局科学研究所. 洋山深水港区二期工程接岸结构原型观测试验阶段性报告[R]. 上海: 中港第三航务工程局科学研究所, 2005.
- [10] 上海深水港工程建设指挥部港口分指挥部. 密排钢管桩挡土墙结构负摩擦研究及应用课题报告[R]. 上海: 上海深水港工程建设指挥部港口分指挥部, 2005.
- [11] 上海航源检测科技有限公司. 上海冠东国际集装箱码头有限公司 3#泊位、4#泊位综合检测评估报告[R]. 上海: 上海航源检测科技有限公司, 2022.
- [12] 刘钦, 李地元, 刘志祥, 等. 水平推力作用下抗滑桩间土拱效应影响因素的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(7): 2071-2077.
- [13] 杨明, 姚令侃, 王广军. 桩间土拱效应离心模型试验及数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 817-822.

(本文编辑 赵娟)